

気泡界面運動と液相運動の相互関係 (GLADシステムの素過程研究 その2)

Correlation of the bubble interface motion and its surrounding liquid motion via LDA
(Fundamental Study on GLAD System, Phase 2)

○学 石飛 正規 (静大院) 学 宮本 悠樹 (静大院) 正 齋藤 隆之 (静大工)

Masaki ISHITOBI, Yuki MIYAMOTO and Takayuki SAITO

Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Hamamatsu, Shizuoka 432-8561

The influence of buoyancy of an isolated air bubble is limited to the narrow region of about 3 times bubble radius from the center of the bubble. However, from the viewpoint of mass transfer, the interaction between the liquid-phase motion and the bubble interface motion is important to control the mass transfer across the interface. In the present study, we discuss the interaction between the interface motion of a bubble of about 3mm diameter and its surrounding liquid motion using LDA.

Key Words: LDV, Single bubble, Interface motion, Fluctuation intensity

1. 緒言

GLADシステム^{1,2,3,4)}は、ガスリフト効果を利用して、低純度CO₂を海水に溶解すると同時にCO₂溶解海水を深海に送り込むシステムである。これまでに、気泡乱流中におけるCO₂含有気泡からの物質移動速度^{5,6)}、気泡周囲の液相運動の構造^{7,8)}、気泡乱流の大規模構造⁹⁾、数値解析による性能予測^{10,11)}、コスト解析と実機性能予測^{12,13)}、200m規模のガスリフト実験¹⁴⁾等により、その実現可能性を実証するとともに、ガスリフトによる揚水制御とCO₂溶解の制御によりpHの低下を抑制しつつ、深海への送り込み性能と効率を確保する手法を検討している。加えて、GLADシステムに適合したCO₂の分離・回収システムに関する基礎研究¹⁵⁾を行っている。

本研究では、気泡乱流の階層構造に着目して、気泡の溶解制御に不可欠な知見として、気泡近傍のローカルな液相運動と気泡界面運動との関係を実験により考察する。GLADシステムの上部付近における気泡径は、2mmから3mm程度と予測される。この気泡は、約70Hzの界面振動を周期で変形を伴いながら液中を上昇する¹⁶⁾。本研究では、気泡近傍における液相運動と気泡界面運動の相互関係を、LDVによって計測する。しかし、気泡界面運動に関する液相運動は気泡界面のごく近傍にあり、LDVの定点計測では捉えきれない。そのためLDV計測点を気泡重心運動に追尾させるように動かして計測した。実験方法ならびに結果の一部を報告する。

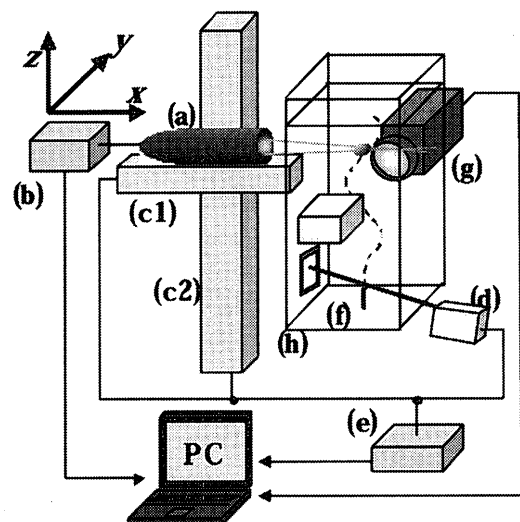
2. 実験装置および方法

Fig.1に実験装置の概略を示す。アクリル製矩形水槽(150×150×300mm)の底部中央に注射針(内径0.78mm)を固定し、x-z平面(y=0)でジグザグ運動するように、静止水中に気泡を射出する。液相、気相はそれぞれイオン交換水(煮沸脱気済み)および純空気である。

XZ2軸ロボットによりLDV(TSI社製)の計測点を気泡重心運動に追随させることにより計測を行った。注射針先端の直上に半導体レーザー通過センサーを設置し、気泡射出時の信号をTTLトリガー信号として、ロボットをス

タートさせる。気泡と計測点との位置関係を知る必要があるが、ロボットの性能上、同通過センサーの信号からスタートをするタイミングに誤差が生じるため、気泡重心運動とLDVレーザー交点を高速ビデオカメラ(500fps, 1024×1024pixel)によって同時撮影した。さらに、2軸ロボットのスタート時刻をAD変換により求め、計測点の位置情報を算出し、気泡との位置関係を比較することにより、LDA交点と気泡との位置関係を定量的に把握した。

LDAのデータ処理においては、気泡散乱ノイズを識別し、除去するアルゴリズム⁸⁾を採用した。LDV計測結果を高速フーリエ変換によって周波数分析し、気泡近傍の液相運動の様子を調べる。



(a) LDA probe, (b) LDA system, (c1, C2) 2axial robot, (d) Laser optic sensor, (e) TTL signal device, (f) Needle, (g) High-speed video camera, (h) Water vessel

Fig. 1: Experimental setup.

3. 実験結果および考察

3.1 気泡軌道とLDV計測点

気泡の球等価径は2.9mmであり、約7Hzでジグザグに上

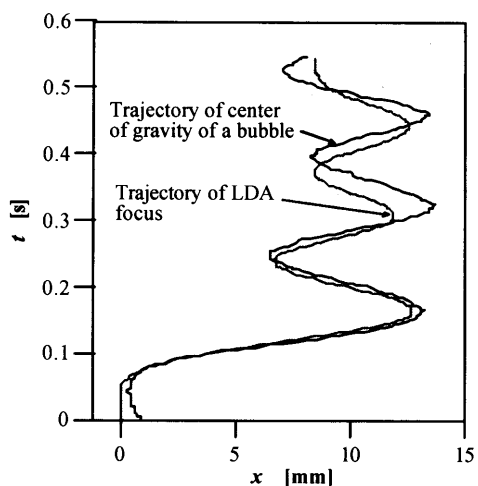


Fig. 2: Trajectories of the center of gravity of a bubble and the LDA focus.

昇運動した。同気泡は、射出直後は左右対称性を有する界面変形を伴って直線上昇運動し、その後、左右非対称な界面変形を伴ってジグザグに上昇運動した¹⁶⁾。

Fig. 2 に気泡重心軌道とLDV計測点の軌道を示す。気泡重心とLDV計測点とはほぼ一定の距離を保っていることがわかる。

3.2 液相運動の周波数解析

LDV 計測によって得られたデータから高速フーリエ変換により周波数分析を行った。注射針先端から水面までLDVプローブを移動させる時間(0.54s)にあるデータのみを解析対象とした。本研究では、z 軸方向の流速に関する解析結果のみを示す。LDVの原理上、流速を等間隔にサンプリングすることが出来ないため、測定値を線形補間により等間隔データとした¹⁷⁾。0.54秒間に計測されたデータ点数は80点であったため、補間後のデータ点数を128点とした。また、ロボットを動かしながらのLDV計測では、ロボットの振動、LDVプローブに対する液相の相対速度を考慮しなければならない。そのため、気泡を射出させずに同様の計測を静止流体に対して行い、周波数を分析した。気泡有りの時の周波数分析結果から、気泡無しの周波数分析結果(10回の平均)の差を求めることで、気泡により誘起された液相運動のみの周波数特性求めた。周波数解析結果をFig.3に示す。また、気泡界面の変形特性を、左右エッジ部の曲率比により表し、その曲率比振動を周波数解析した結果をFig.4に示す。鎖線の楕円で示す箇所に液相運動と界面運動に共通の特徴的な周波数が見出される。LDA計測においては、気泡散乱ノイズは完全に除去されているので、本周波数は気泡界面振動に呼応した液相運動の特徴的な周波数と考えてよい。

4. おわりに

液相運動に関しては、まだ実験データを集積中であり、今後、より精度の高い結果に基づいて、より突っ込んだ解析を行いたい。

参考文献

- 1) T. Saito, T. Kajishima and K. Tsuchiya: *US Patent* No. 6254667, (2001).
- 2) T. Saito, T. Kajishima: *US Patent* No.5662837, (1997).

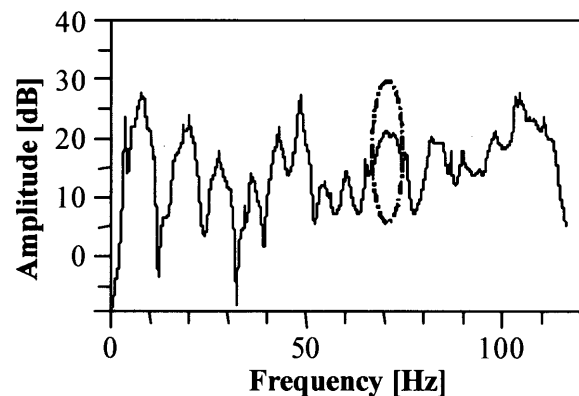


Fig. 3: Frequency analysis of liquid-phase motion.

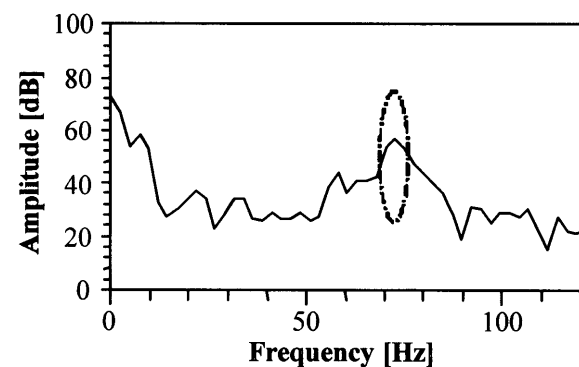


Fig. 4: Frequency analysis of the interface motion of the bubble.

- 3) T. Saito, T. Kajishima and K. Tsuchiya: *Australian Patent* No. 752995, (2003).
- 4) T. Saito, T. Kajishima and R. Nagaosa: *Environmental Science and Technology*, 34, 4140–4145, (2000).
- 5) T. Saito, T. Kajishima, K. Tsuchiya and S. Kosugi: *Chemical Engineering Science*, 54, 4945–4951, (1999).
- 6) K. Tsuchiya, T. Saito, T. Kajishima, S. Kosugi: *Chemical Engineering Science*, 56, 6411–6417, (2001).
- 7) T. Saito, K. Tsuchiya and T. Kajishima: *Experimental Thermal & Fluid Science*, in print, (2004).
- 8) T. Saito, H. Kusano, K. Tsuchiya and T. Kajishima: *Chemical Engineering Science*, to be published, (2005).
- 9) R. F. Mudde and T. Saito: *Journal of Fluid Mechanics*, 437, 203–228, (2001).
- 10) T. Kajishima, T. Saito, R. Nagaosa and H. Hatano: *Energy Conversion & Management*, 36, 467–470, (1995).
- 11) T. Kajishima, T. Saito and R. Nagaosa: *Energy*, 22, 257–262, (1997).
- 12) S. Kosugi, K. Niwa, T. Saito and T. Kajishima: *Chemical Engineering Science*, 56, 6205–6210, (2001).
- 13) T. Saito, S. Kosugi, T. Kajishima and K. Tsuchiya: *Energy & Fuels*, 15, 285–292, (2001).
- 14) T. Saito, T. Kajishima and K. Tsuchiya: *Experimental Thermal & Fluid Science*, (2004).
- 15) T. Saito, H. Mizuno and K. Tsuchiya: *Chemical Engineering Science*, in review, (2004).
- 16) 宮本, 齋藤: *機論B編*, 投稿中, (2004).
- 17) R. F. Mudde and H. A. Van Den Akker: *Chemical Engineering Science*, 54, 4921–4927, (1999).